

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

OPTIMAL ROLLING MODE CONTROLLING OF HIGH CARBON WIRE ROD ON CONTINUOUS ROLLING MILL

А.А. Пономарев¹, С.И. Литвинов¹, В.А. Шилов²

¹ ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» филиал «Березовский», г. Березовский, e-mail: Ponomarev_AA@mh.ru

² ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, e-mail: omd@mtf.ustu.ru

Улучшение механических свойств металлопроката является одной из важных задач развития современной металлургии, так как позволяет получить существенную экономию в различных отраслях промышленности и строительства. Поэтому при прокатке на новых и действующих станах необходимо применять оптимальные технологические режимы, обеспечивающие максимально возможное (в пределах стандартов) повышение прочностных и пластических свойств проката (например, предела прочности σ_b , относительного сужения ψ и др.).

Для разработки таких оптимальных технологических режимов прокатки катанки и мелкосортных профилей на новом мелкосортно-проволочном стане 150 ОАО «НСММЗ» [1] применили методы исследования операций [2, 3]. При этом в качестве целевой функции (критерия оптимизации) w принимали основную, соответствующую заданному (по ГОСТ или ТУ) назначению проката механическую характеристику Z (например, для арматурной стали Z – предел прочности σ_b , а для низкоуглеродистой катанки прямого волочения Z – относительное сужение ψ). Одновременно учитывали установленные стандартами предельные значения: $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$, а также ограничения на другие механические свойства (δ_5 , ψ , σ_T и др.).

В качестве дескриптивной математической модели, выражающей зависимость оптимизируемой величины Z от параметров термомеханической обработки, приняли соответствующие уравнения регрессии, полученные в работе [5]. Для расчета технологических параметров процесса прокатки на стане 150 применили математическую модель УрФУ [6], реализованную в виде экспертной системы «Технология сортовой прокатки» [7, 8]. Для определения температурного состояния металла на различных участках стана использовали специально разработанную математическую модель температурных режимов прокатки и охлаждения раската [9]. В соответствии с указанными математическими моделями необходимо сформировать вектор управления технологическими режимами U (x_1 , x_2 , x_3 и др.). Оценивая составляющие этого вектора по значимости влияния на оптимизируемую механическую характеристику, выделяют наиболее значимый параметр управления X и ранжируют по значимости остальные управляющие параметры, входящие в полученные уравнения регрессии (8 – 11) [5].

С учетом изложенного задача оптимизации режима сводится к поиску такого управления $U^*(X^*)$, при котором достигается максимум целевой функции:

$$Z^* = \max[Z(X^*)] \quad (1)$$
$$X^* \in U$$

Для поиска экстремума целевой функции в подобных задачах обычно применяют численные методы оптимизации [4, 10], которые базируются на вычислительных и логических операциях и сводятся к построению алгоритмов с использованием эвристических соображений. Одним из таких методов является метод возможных направлений [10].

Сущность этого метода заключается в следующем: из начальной допустимой (по условиям задачи) точки X_0 осуществляется переход к новой допустимой точке, в которой значение целевой функции Z лучше, чем в точке X_0 . Этот процесс продолжается до тех пор, пока сохраняется возможность улучшения Z в пределах действующей системы ограничений, т.е. в допустимой области. Если определена очередная точка X_k , то переход к следующей точке осуществляется в соответствии с формулой:

$$X_{k+1} = X_k + a_k r_k, \quad (2)$$

где a_k – величина k -го шага, r_k – единичный вектор, в направлении которого производится этот шаг.

Если вектор управления U содержит несколько параметров X (x_1 , x_2 , x_3 ...), то описанную процедуру оптимизации следует проделать по каждому параметру x_1 , x_2 , x_3 ..., начиная с наиболее значимого параметра.

На основе рассмотренных выше общих положений разработан алгоритм поиска оптимальной механической характеристики Z . При заданных в исходной информации размерах и требуемых механических свойствах Z ($Z_{\min} < Z < Z_{\max}$) в общем случае алгоритм включает следующие операции:

1. В математической модели (8 – 11) [5] выделяют уравнение регрессии, выражающее зависимость механической характеристики Z от термомеханических параметров X_i (d , V_k , $t_{B/O}$ и др.). Анализируя это уравнение, ранжируют параметры управления X_i по значимости влияния на Z , определяют возможные направления изменения каждого параметра X_i при максимизации Z .

2. Присваивают каждому параметру управления численные значения с учетом опыта производства аналогичных видов проката (при этом целесообразно использовать базы данных, архивы стана или проектные режимы) и рассчитывают по

уравнению регрессии начальное приближение характеристики $Z=Z_0$.

3. Далее ведут оптимизацию с изменением наиболее значимого управляющего параметра x_1 , в качестве которого обычно используется температурный фактор (например, температура конца прокатки или температура виткообразования).

3.1. По разработанной модели и алгоритмам расчета температурного режима прокатки и охлаждения металла [9] определяют температуру раската на каждом участке стана (в черновой, промежуточной и предчистовых группах клетей, в камерах предварительного водяного охлаждения, в чистовом блоке клетей, на виткоукладчике и т.д. (рис.1)).

3.2. Моделируют в экспертной системе «Технология сортовой прокатки» процесс прокатки заданного профиля с максимально возможной конечной скоростью прокатки, в результате чего рассчитывают все технологические и энергосиловые параметры.

3.3. Проверяют ограничения рассчитанного режима по силовой загрузке оборудования стана. Если какое-либо ограничение не выполняется, вносят соответствующие изменения в управляющие параметры и производят повторные расчеты в ЭС «Технология сортовой прокатки».

3.4. По регрессионной модели (8 – 11) при полученных параметрах управления рассчитывают новое значение (новое приближение) характеристики $Z=Z_1$.

3.5. Проверяют ограничения по механическим свойствам $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$ и оценивают степень близости Z_1 к Z_{\max} с принятой точностью:

$$\frac{Z_{\max} - Z_1}{Z_{\max}} < 0,05 \quad (4)$$

Если это условие не выполняется, и рассчитанное значение Z_1 далеко от максимального по ГОСТ, то принимают новое значение управляющего параметра согласно условия (2) и производят повторные расчеты по пунктам 3.1 – 3.5 до выполнения условия (3). Окончательно полученное значение Z_i считается условно оптимальным $Z_1=Z^*(x_1^*)$.

4. Проводят оптимизацию по следующему по значимости управляющему параметру x_2 , изменяя его от исходного значения, принятого ранее, в направлении, способствующем максимизации Z . При этом проводят необходимые расчеты с использованием разработанных алгоритмов и программ и в результате получают оптимальное значение x_2^* и новое, условно оптимальное значение целевой функции $Z^*(x_1^*, x_2^*) < Z_{\max}$. Если в ходе расчетов получается $Z > Z_{\max}$, то меняют направление изменения x_2 на обратное.

5. Аналогично проводят оптимизацию по каждому из оставшихся параметров управления и окончательно получают технологический режим с оптимальным значением механической характеристики $Z^*(x_1^*, x_2^*, x_3^* \dots)$.

При этом в качестве возможных направлений оптимизации используют температурный режим прокатки, конечную скорость прокатки, скорость движения транспортера витков, количество открытых и закрытых крышек и т.п.

По разработанному алгоритму был рассчитан приведенный ниже оптимальный технологический режим производства катанки диаметром 5,5 мм из стали 80.

В качестве начальных параметров для оптимизации был задан пусковой режим прокатки: температура нагрева заготовки $t_n=1055^\circ\text{C}$; конечная скорость прокатки $V_k=110$ м/с; температура виткообразования $t_{в/о}=950^\circ\text{C}$; все теплоизоляционные крышки открыты, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера $V_r=0,8\div 1,2$ м/с. Расчетное время охлаждения на роликовом транспортере составило $\tau_{отк}=116,83$ с, $\tau_{зак}=0$ с, $\tau_{вент}=0$ с.

При заданных исходных условиях по алгоритмам и программам расчета температурного режима прокатки и охлаждения [9] была определена температура раската на всех участках стана (см. рис., кривая 1). Моделирование технологических и энергосиловых параметров прокатки, проведенное в экспертной системе «Технология сортовой прокатки», показало, что все ограничения технологического режима выполняются. Выполнив расчет по регрессионным моделям (8) и (9) [5], получили $\psi=65,74\%$, $\sigma_b=720,25$ МПа. Полученное значение относительного сужения соответствует требованиям стандарта ($\psi \geq 32\%$, $\sigma_b=1100\div 1280$ МПа), однако временное сопротивление разрыву $\sigma_b < \sigma_{b\min}$. Поэтому оптимизацию провели по критерию

$$W^* = \sigma_b^* \rightarrow \max [W(q, U^*)]. \quad (6)$$

Вначале провели оптимизацию с управлением по температуре виткообразования, приняв ее равной 900°C . Температурный режим прокатки и охлаждения по такому режиму представлен на рисунке (кривая 2).

На рисунке видно, что в процессе прокатки в блоке клетей раскат значительно разогревается, и ускоренное охлаждение в камерах за блоком клетей может привести к образованию участков подкалки, что не допускается техническими условиями. Поэтому была снижена конечная скорость прокатки до 85 м/с. Рассчитанный температурный режим прокатки приведены на рисунке (кривая 3).

Проведя соответствующие расчеты по п. 5 алгоритма, получили новое условно оптимальное значение относительного сужения $\psi_2^*=53,32\%$ при временном сопротивлении $\sigma_b=820,16$ МПа. Полученное значение σ_b также не соответствует требованиям стандарта.

Поскольку дальнейшее снижение скорости прокатки приведет к снижению производительности стана, в качестве нового параметра управления выбрали время охлаждения вентиляторным воздухом на участке роликового транспортера, задав его равным 25,4 с, что соответствует семи включенным вентиляторам. График изменения температуры раската в процессе прокатки и охлаждения представлен на рисунке (кривая 3).

В результате расчетов получили новое значение относительного сужения – $\psi_3^* = 40,05\%$ и временного сопротивления разрыву $\sigma_b = 1130$ МПа. Полученные значения механических свойств полностью удовлетворяют условиям стандарта. При этом энергосиловая нагрузка оборудования понизилась.

Таким образом, проведенная для катанки диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали 80 оптимизация позволила получить удовлетворительное значение относительного сужения при высокой прочности.

Однако при переработке катанки потребителем были отмечены относительно высокий уровень обрывности при «мокром» волочении и свивке (в результате наличия в структуре катанки цементитной сетки), а также недостаточно полное удаление окалины механическим путем. Для улучшения этих

показателей техническим управлением ОАО «НСММЗ» был проведен комплекс мероприятий, включающих в себя:

- снижение содержания углерода до 0,79-0,81%, марганца до 0,54-0,55% для снижения углеродного эквивалента, оказывающего влияние на наличие в структуре катанки цементитной сетки;

- снижения температуры раската перед шахтой виткосборника до 250-300°C (за счет вентиляторов воздушного охлаждения) с целью улучшения механической удаляемости окалины.

Для проведения исследовательской работы в ЭСПЦ ОАО «НСММЗ» была разлита серия плавок стали марки 80 с пониженным содержанием углерода (таблица). Таким образом, дополнительно использовали еще одно направление оптимизации – по химическому составу.

Таблица

Химический состав исследуемых плавок стали марки 80

Элементы		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	N
Технологические требования	min	0,810	0,160	0,580	-	-	-	-	-	-
	max	0,840	0,180	0,600	0,020	0,020	0,100	0,100	0,100	0,006
Требования НИР	min	0,79	0,160	0,520	-	-	-	-	-	-
	max	0,81	0,180	0,580	0,020	0,020	0,100	0,100	0,100	0,006
	Цель	0,80		0,550						
20834		0,810	0,160	0,541	0,006	0,004	0,049	0,060	0,072	0,005
20546		0,784	0,169	0,541	0,003	0,004	0,036	0,060	0,070	0,005
20837		0,810	0,162	0,549	0,005	0,004	0,041	0,050	0,052	0,005
20835		0,810	0,161	0,549	0,005	0,004	0,042	0,050	0,062	0,005
20548		0,793	0,169	0,546	0,004	0,004	0,029	0,040	0,055	0,006
20549		0,791	0,164	0,549	0,002	0,004	0,025	0,040	0,046	0,006
20731		0,802	0,161	0,535	0,007	0,003	0,026	0,049	0,049	0,005
21159		0,802	0,161	0,535	0,007	0,003	0,026	0,049	0,049	0,005
27027		0,812	0,161	0,550	0,008	0,003	0,025	0,048	0,048	0,006
27025		0,806	0,167	0,581	0,009	0,004	0,033	0,051	0,053	0,007
20547		0,799	0,169	0,541	0,004	0,004	0,036	0,050	0,065	0,005
20836		0,804	0,159	0,544	0,004	0,004	0,039	0,050	0,054	0,005

Было определено, что для достижения температуры перед шахтой виткосборника в 250-300°C, необходимо использовать 10 вентиляторов на участке воздушного охлаждения.

Результаты испытаний катанки, произведенной по полученному оптимальному режиму с добавлением трех вентиляторов на участке воздушного охлаждения, показали ее соответствие требованиям НД, отсутствие цементитной сетки в микроструктуре катанки, хорошую механическую удаляемость окалины.

Выводы

На основе полученных ранее в УрФУ математических моделей технологических процессов сортовой прокатки с применением методов исследования операций разработана методика оптимизации режимов термомеханической обработки раската на современном мелкосортно-проволочном стане с целью улучшения механических свойств проката. Использование этой методики на стане 150 ОАО «НСММЗ» позволило добиться оптимального сочетания пластических и прочностных свойств катан-

ки из высокоуглеродистой стали 80. С целью достижения наилучших показателей по микроструктуре необходимо применение комплекса мероприятий, включающих оптимизацию не только технологических параметров прокатки и охлаждения на стане, но и оптимизацию химического состава в пределах требований нормативно-технической документации.

Список литературы

1. Пономарев А.А., Гурбан Е.С., Шилов В.А. Новый мелкосортно-проволочный стан. // Производство проката. 2010. №8. С. 13-14.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.
3. Вагнер Г. Основы исследования операций: Пер. с англ. М.: Мир, Т1. 1972. 366с; Т2. 1973. 488с. Т3. 1973. 501с.
4. Оптимизация прокатного производства/А.Н. Скороходов, П.И. Полухин, Б.М. Илюкович и др. М.: Металлургия, 1983. 432с.
5. Пономарев А.А., Шилов В.А. Математическая модель механических свойств проката мелкосорт-

- но-проволочного стана 150. // Производство проката. 2012. №8. С. 12-16.
6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Теплотехник, 2008. 491 с.
7. Куделин С.П., Инатович Ю.В., Шилов В.А. Экспертная система технологии сортовой прокатки. // Программные продукты и системы. 2000. №3. С.35–39.
8. Шилов В.А., Смирнов В.К., Эйдензон В.М. Новое поколение САПР технологии сортовой прокатки. // Сталь, 2001. №4. С. 36 – 38.
9. Пономарев А.А., Шилов В.А., Николаев М.С. Управление температурными режимами прокатки на мелкосортно-проволочном стане. // Производство проката. 2011. №8. С. 18 – 23.
10. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации. М.: Радио, 1980. 272 с.

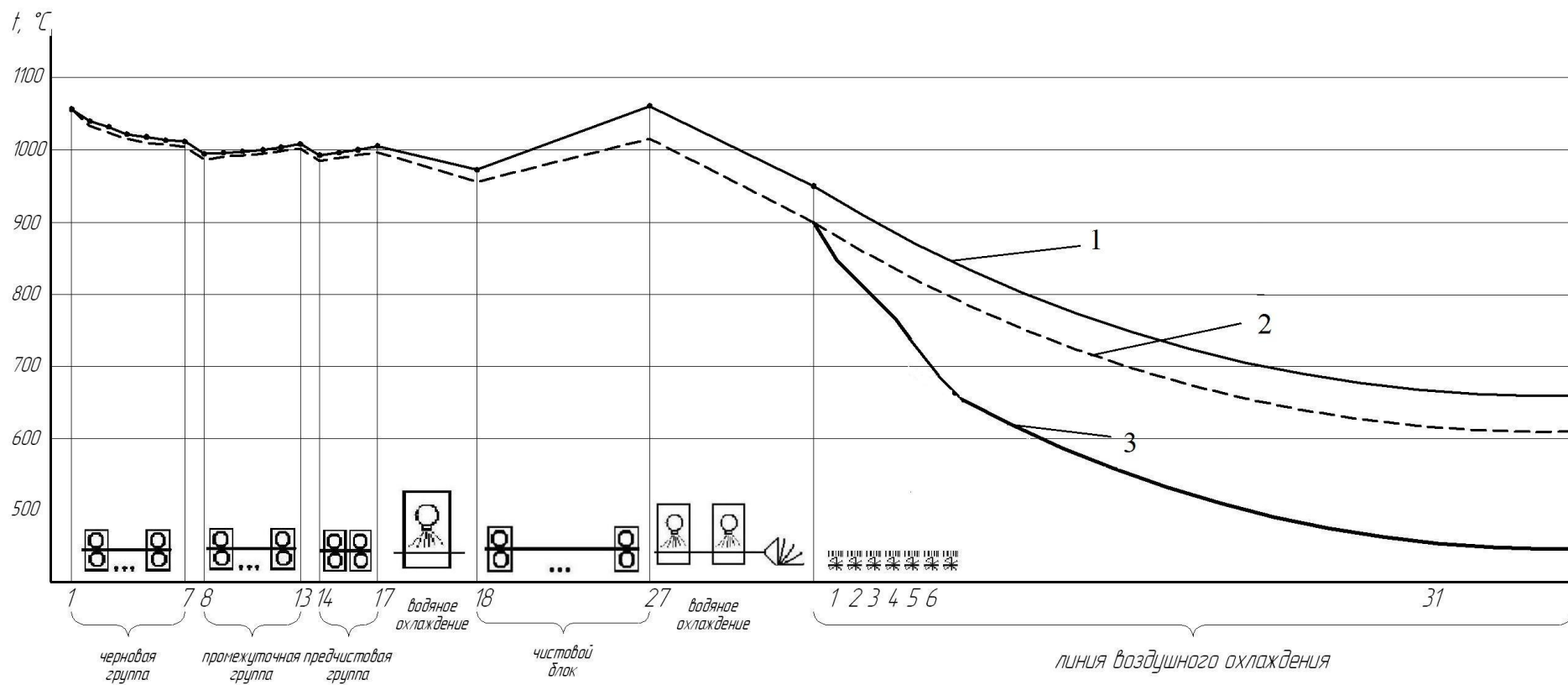


Рис. Температурный режим при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали 80: 1 – исходный; 2 – условно оптимальный при температуре виткообразования 900°C; 3 – оптимальный режим при охлаждении витков на транспортере вентиляторным воздухом.